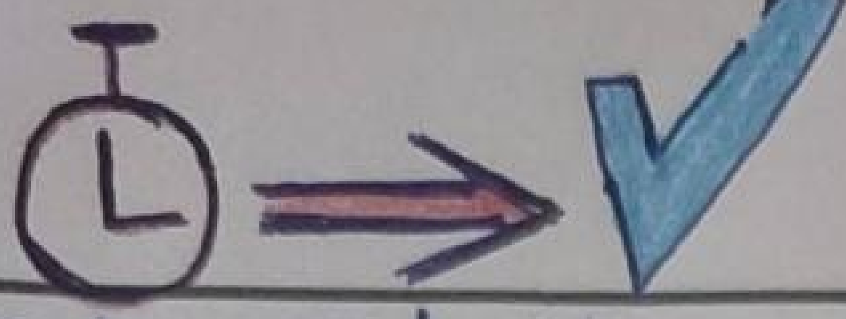




كلية الهندسة البترولية

3

مكتبة فادي

فرع الجامعة العربية الخاصة للعلوم والتكنولوجيا

اسم المقرر : صيانة أبارو إصلاحها/نظري

الدكتور/ة : عبد الستار كحيل

المحاضرة : 5

الفصل : الثاني

(20)

0936155875 0964616343
f.Kalboon@gmail.com مكتبة فادي

المحاضرة الخامسة

معالجة الآبار النفطية بالتحميض

١- مقدمة:

إن إنتاجية المكامن النفطية تنخفض باستمرار مع مرور الزمن، ويعود انخفاض هذه الإنتاجية لعدة أسباب أهمها انخفاض نفوذية الطبقة الخازنة.

ولزيادة إنتاجية الآبار يستخدم عدة طرق لزيادة نفوذية الطبقة المنتجة وخاصة المناطق المحيطة بالبئر، والتي تتعرض للتلوث الذي يسبب انخفاض نفوذيتها بشكل أكبر من غيرها من المناطق.

وتعد عملية التحميض الكيميائي من أقدم ومن أهم الطرق المستخدمة لتحسين الإنتاجية من خلال تحسين نفوذية الطبقة الحاملة للنفط، وقد بدأ تطبيق هذه الطريقة منذ عام (١٩٣٠) حيث عولجت الطبقة بحمض محقون إلى عمق معين يعمل على إذابة بعض الصخور، وكذلك أثر على الإسمنت الرابط بين حبيبات الصخر، أما استخدام الحمض لتنظيف جدران البئر من آثار سائل الحفر والمواد الملوثة الأخرى المتوضعة على الجدران فقد طبق منذ عام (١٨٩١)

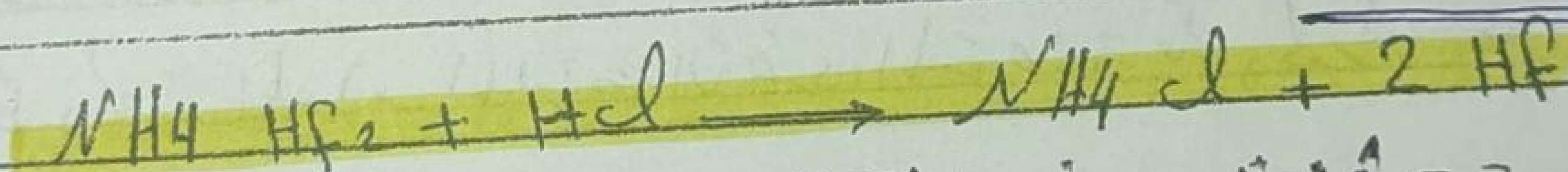
٢- أنواع الحموض:

① يوجد أربعة أنواع رئيسة من الحموض التي تستعمل في معالجة الصخور وهي:

* **حمض كلور الماء (HCl):** هو سائل مخرش يؤثر على الجلد لدى التلامس معه ويتفاعل معه، ② ويؤثر أيضاً على الأعضاء التنفسية عند استنشاقه لذلك يجب التقيد بشروط السلامة المهنية عند التعامل مع هذا الحمض، وهو يتفاعل مع الصخور الكربوناتية ومع ملاط الترابط الكلسي بين الحبيبات الرملية من الصخور الرملية، ويعطي أملاحاً منحلة (كلور الكالسيوم وكلور المغنزيوم) وغاز CO_2.

يتراوح تركيز هذا الحمض التجاري بين (30-34٪) ، ويستخدم في المحاليل الحمضية بتركيز أقل مثل المجال (13-28٪) ، ويكون هو أيضاً من عيوبات الاستعمال تآكل الأغلفة ويحتوي على شوائب أهمها أكاسيد الحديد، حمض الكبريت، ثاني أكسيد الكبريت.

② ① * حمض الفلور (HF) : هو سائل سام خطير ويجب التعامل معه وفق شروط السلامة الصحيحة ، وهو يتفاعل مع السليكات ، المعادن الرمل (الكوارتز SiO_2) ، لا يستخدم مع الكربونات ، إلا أنه يترك مع الكربونات رواسباً هيدروفلوريد الكالسيوم ، وتركيز هذا الحمض التجاري (38-40٪) ، ويستعمل بشكل أساسي لمعالجة الصخور الرملية ، ويكون مزيج مع حمض الكلور الماء أو أي حمض عضوي آخر ، والمزيج (HF.HCl) يسمى حمض الطفلة ، ويكون هنا تركيز (HCl = 12٪) و (HF = 3٪).
يمكن الحصول على حمض الفلور من أملاح الصلبة مثل بيوفلوريد الأمونيوم (NH_4HF_2) الذي يمزج مع (HCl) على السطح أو في الطبقة ليعطي حمض الفلور :



$$NH_4HF_2 + HCl \longrightarrow NH_4Cl + 2HF$$

مهمة جداً كثيراً

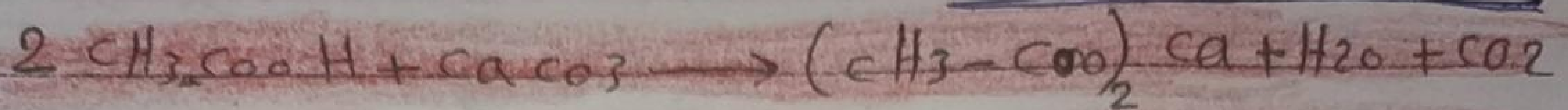
وهذه الطريقة أفضل بهدف التقليل من التأثير السلبي والتآكلي لهذا الحمض على العناصر التي تتعامل معه أو مع المعدات المعدنية.

③ * الحموض العضوية : تستخدم في الآبار العميقة ذات الحرارة العالية لتحسين نفوذية هذه الطبقات ، نظراً لأن سرعة تفاعلها مع الكربونات أقل من سرعة الحموض اللاعضوية ، وأهم هذه الحموض هو حمض الخل (CH_3COOH) الذي يصل تركيزه التجاري إلى (98٪) ، ويستخدم بتركيز (2-3٪) مع حمض كلور الماء بتركيز (15٪).

ومن المعروف أن الحموض العضوية أضعف من الحموض اللاعضوية وتتفاعل ببطء أكبر وتظهر تآكلاً أقل للمعدات.

تتفاعل الحوامض العضوية المستعملة في المعالجة مع الصخور الكربونية وفق المعادلات التالية:

كربونية

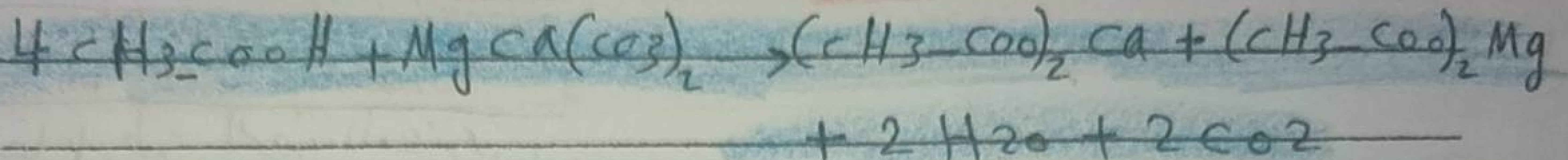


$$2CH_3COOH + CaCO_3 \rightarrow (CH_3-COO)_2Ca + H_2O + CO_2$$

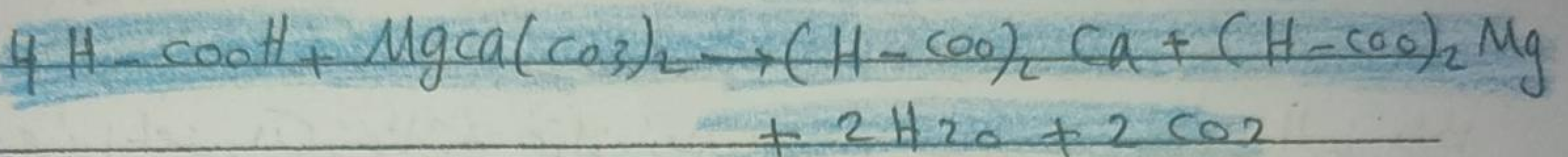


$$2H-COOH + CaCO_3 \rightarrow (H-COO)_2Ca + H_2O + CO_2$$

ملحية



$$4CH_3COOH + MgCa(CO_3)_2 \rightarrow (CH_3-COO)_2Ca + (CH_3-COO)_2Mg + 2H_2O + 2CO_2$$



$$4H-COOH + MgCa(CO_3)_2 \rightarrow (H-COO)_2Ca + (H-COO)_2Mg + 2H_2O + 2CO_2$$

خلات وخلات الكالسيوم والمغنيسيوم تذوب بالماء وتبعد بسهولة من الطبقة.

(1)

47 * **الحوامض المركبة:** عملية خلط ومزج حامض كلور الماء مع الحوامض العضوية بهدف إطالة زمن التفاعل وذلك في الطبقات ذات التشبع تحت ضغوط عالية كحامض الخل أو حامض النمل للحصول على حامض بطيء التفاعل (منشط) يدخل في الطبقة ويتفاعل معها ببطء.

(2)

وفي معالجة الطبقات الرملية الشبه كتيمة (مثلاً طبقة كوردشينا دولوميتية) يتم إضافة حامض الفلوريد بنسبة ضئيلة إلى حامض كلور الماء تتراوح هذه النسبة بين (2-3%) لكل متر مكعب واحد من حامض كلور الماء.

وتستخدم هذه الخلطة أيضاً في معالجة الطبقات المنتجة الحاوية على تداخلات غضارية.

(3)

يعد مزج الحوامض من العمليات المهمة لتشكيل الحوامض المثبطة، وذلك من أجل اختراق أعمق للطبقة وتحسين فعالية المعالجة الحمضية.

- ويعرف الحامض المثبط بأنه حامض ذو صفات فيزيائية وكيميائية وتركيز معين يعطي فعالية لزمن أطول لـ (15%) من حامض (HCl) تحت نفس الظروف كما يحقق اختراقاً أعمق.

١- حمض كلور الماء HCl
٢- حمض الفلور HF
٣- الحموض العضوية
٤- الحموض المركبة

أنواع الحموض

• يمنع زيادة تركيز الحموض العضوية بهدف الحصول على زيادة معدل التفاعل كما تعتبر الحموض العضوية ملائمة وأكثر استعمالاً في الآبار ذات درجات الحرارة العالية فوق (200 °F).

للحصول على نتائج إيجابية لحمض كلور الماء السريع التفاعل ولزيادة عمق اختراقه يخلط مع الحموض العضوية لتشكيل حمض مثبط لتأمين تفاعل سريع بداية لـ (HCl) وتفاعل بطيء للحمض العضوي.

وعلى الرغم من أن الحموض المثبطة لها زمن تفاعل أكبر من HCl تحت نفس الظروف لكن صخور الكربوناتية تختلف زمن تفاعلها، حيث تدخل الحمض داخل الصخور الكربوناتية غير المتجانسة تؤدي مع طاقته لاستمرار من الأثر الايجابية ومن أشكال التفاعل:

ما هي أهمية عملية التحميض

أهمية عملية التحميض:

تطبق عملية التحميض للأغراض التالية:

(١) تنظيف الشوائب الموجودة على جدران البئر مقابل الطبقة المنتجة، أو تلك المتوضعة في القنوات التي تجري خلالها الموائع.

(٢) توسيع مسامات الصخور بجوار جدران البئر.

(٣) توسيع وتنظيف الشقوق الموجودة في الصخور.

(٤) تشكيل قنوات جديدة نفوذية عالية وذات عمق كبير يصل البئر بالمنطقة المشبعة بالنفط.

(٥) توسيع قطر البئر.

(٦) تنظيف المنطقة الملوثة بجوار البئر.

حتى يكون الحمض المستخدم فعالاً وذا تأثير مقبول يجب أن يحقق الشروط التالية:

(١) أن يتفاعل مع الكربونات أو مع المركبات الأخرى أو الرواسب ليشكل محاليل سائلة.

الشروط الواجب توفرها بالحموض:

① أن تتفاعل مع الكربونات والصخور الكلسية وتشكل مركبات سائلة

② ألا تتفاعل بشدة مع الأجزاء المعدنية في البئر حتى لا يسبب تآكلها.

③ أن يكون سهل التداول وتكاليفه معقولة.

العوامل المؤثرة على تفاعل الحمض مع الصخر:

إن معرفة العوامل المؤثرة على التفاعل بالإضافة إلى معرفة ميزات الصخر الخازن يمكننا من التحكم في اختيار نوع الحمض وكميته لتأمين نجاح عملية التحميض، ومن أهم العوامل الأساسية المؤثرة نذكر:

① [1] **الضغط**: إن سرعة التفاعل بين الحمض والصخور الكربوناتية تتناقص مع زيادة الضغط ويمكن توضيح ذلك بالتفاعل التالي:



$$CaCO_3 + 2HCl \leftrightarrow CaCl_2 + H_2CO_3$$



$$H_2CO_3 \leftrightarrow CO_2 + H_2O$$

إن التفاعل يتم باتجاه اليمين في حال كون CO_2 بحالة غازية ويزداد انحلال الكلس، أما عندما ينحل CO_2 في الماء فإن التفاعل يتم باتجاه اليسار أي يتوقف انحلال الكلس، ويمكن أن يكون CO_2 بشكل سائل عند الضغط $(55-70\ at)$ ودرجة حرارة أقل من $(30\ °C)$، وهذا نادراً ما نصادفه في الطبقات الحاملة للنفط، لكن في كل الأحوال فإن CO_2 ينحل في السائل الحمضي المتفاعل ودرجة انحلاله تزداد بازدياد الضغط إذن سرعة التفاعل تتناقص بازدياد الضغط، ويوضح الشكل (1) العلاقة بين سرعة التفاعل والضغط.

② [2] **درجة الحرارة**: إن سرعة تفاعل الحمض تزداد بشكل مباشر بازدياد درجة الحرارة، ويتفاعل الحمض في المجال القريب من البئر وبذلك لا نستطيع ضخ كميات كبيرة من الحمض في الطبقة، وهنا يجب أن نأخذ بالاعتبار درجة حرارة الحمض المضخوخ ودرجة حرارة الصخر الخازن بالإضافة إلى درجة الحرارة المتحررة الناتجة عن التفاعل

وعلينا أن نخفض تأثير الحرارة باستخدام مبطئات التفاعل، أو عن طريق تبريد شديد

الضغط، درجة الحرارة، حجم الشقوق، نواتج التفاعل، تركيز الحمض

للمنطقة القاعية باستخدام الأنبوب لسائل أو ضخ الحمض بمعدلات عالية.

(3) [٣] تركيز الحمض: عند استعمال سائل حمضي بتركيز قليل يجب ضخ كميات كبيرة من هذا السائل في الطبقة حيث يدخل إلى أعماق كبيرة يصعب عندها إعادة سحبه عند انتهاء عملية المعالجة.

أما عند استعمال سائل حمضي بتركيز كبير بعد انتهاء التفاعل تزداد كثافة اللزوجة السائل بسبب انحلال نواتج التفاعل التي تؤثر على معدل التفاعل وينقص بسببها.

كما أن التركيز المرتفع للحمض ينشط عمليات تآكل المعدات المستخدمة.

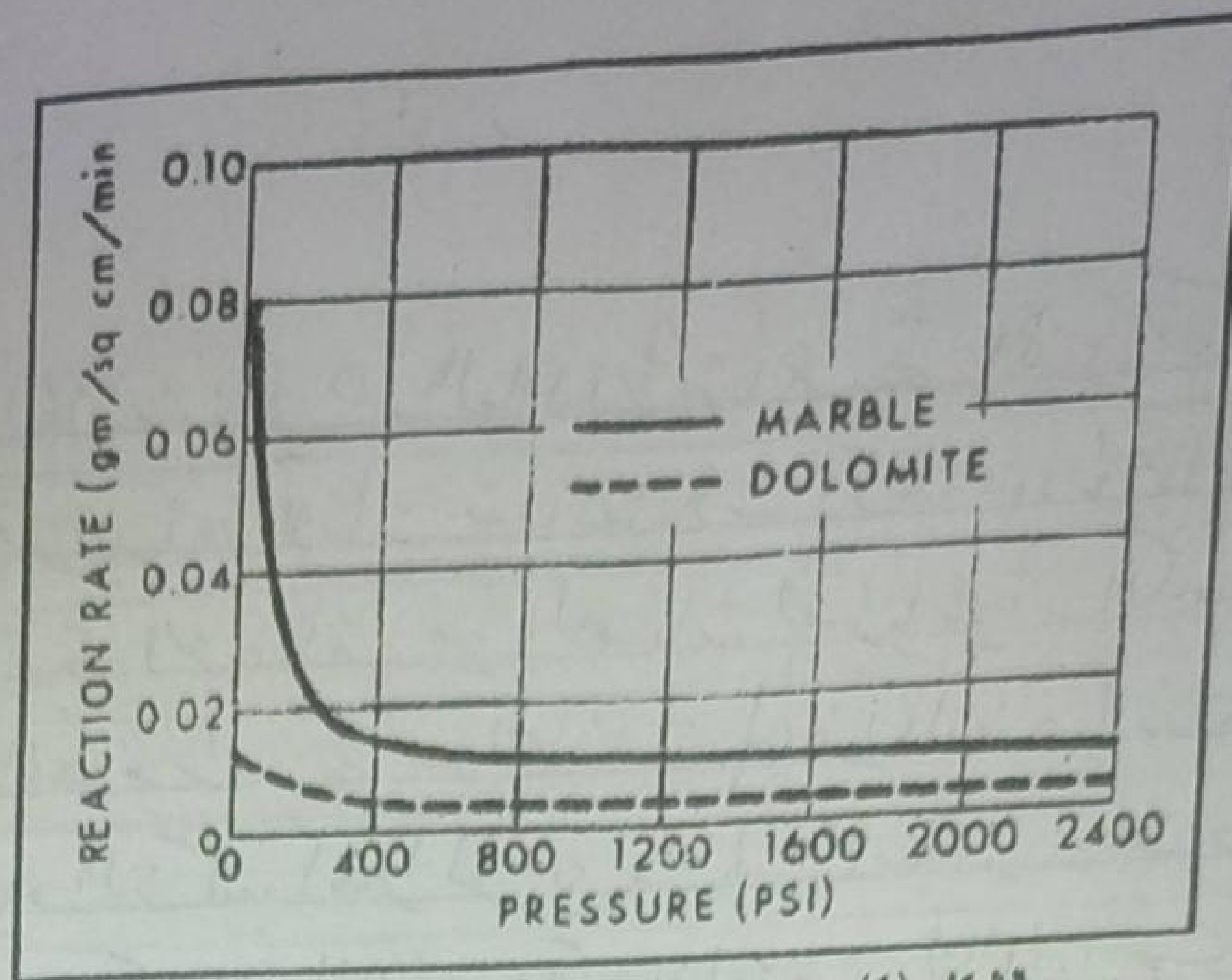
تم التوصل نتيجة التجارب المخبرية إلى أن أفضل تركيز للحمض هو (10-15 %)

وعادة تستخدم تراكيز كبيرة للصخور ذات النفوذية الضعيفة وتراكيز قليلة للطبقات ذات النفوذية العالية. ويبين الشكل (2) علاقة تركيز حمض الماء ومعدل التفاعل، حيث نلاحظ من الشكل أن معدل التفاعل يزداد مع تركيز (15-20 %) وهذه الزيادة تصل حدها الأقصى وهو (24-25 %) وفوق هذا التركيز فإن معدل التفاعل يتناقص قليلاً.

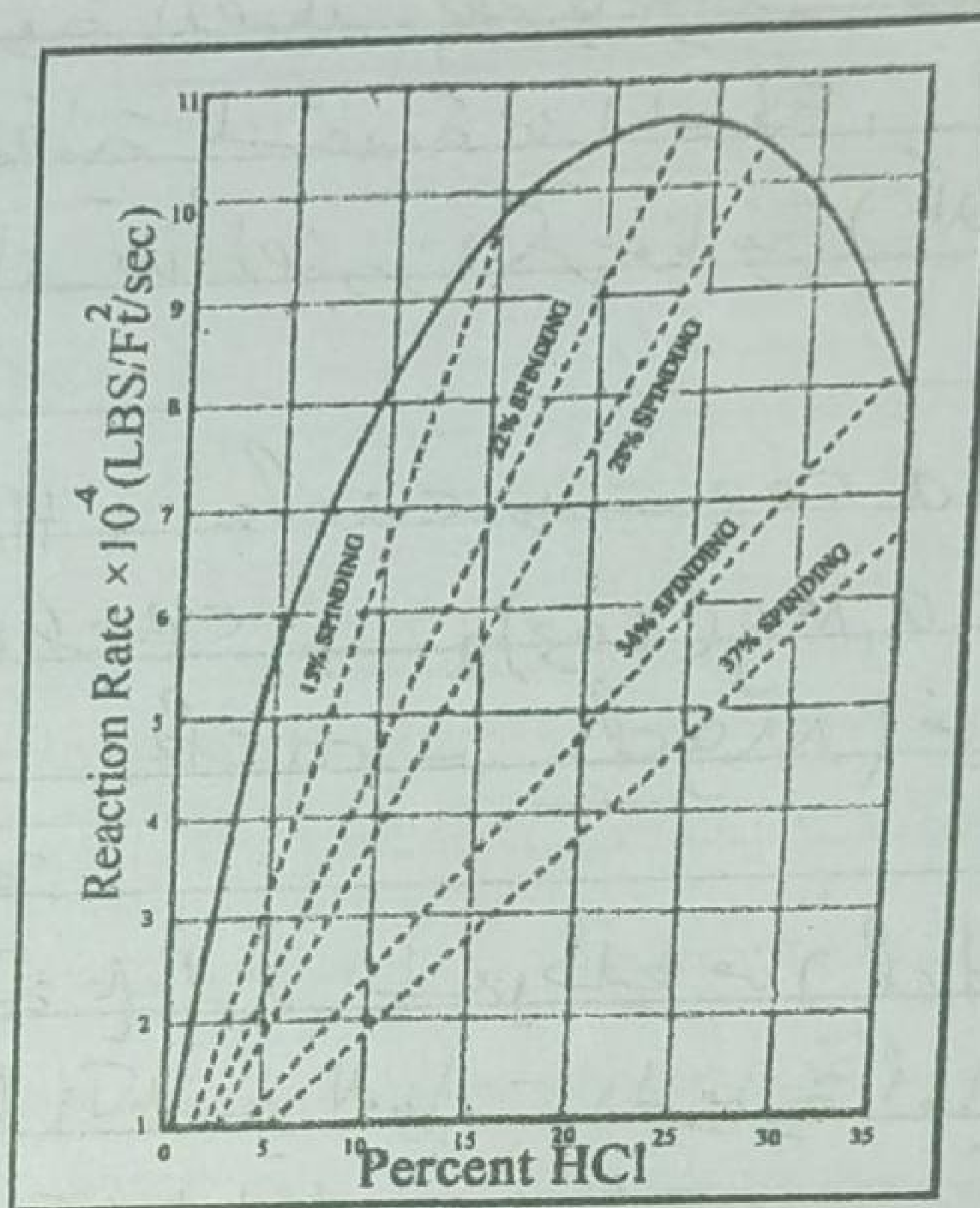
(4) [٤] سرعة التدفق: إن سرعة تدفق السائل الحمضي داخل الصخور الكربوناتية تؤثر على المسافة التي يقطعها السائل الحمضي في الطبقة، وبزيادة سرعة التدفق للحمض يزداد معدل التفاعل للحمض مع الصخر.

ويوضح الشكل (3) أنه عند سرعة تدفق محددة يزداد معدل التفاعل للحمض مع الصخر بنقصان عرض الشق.

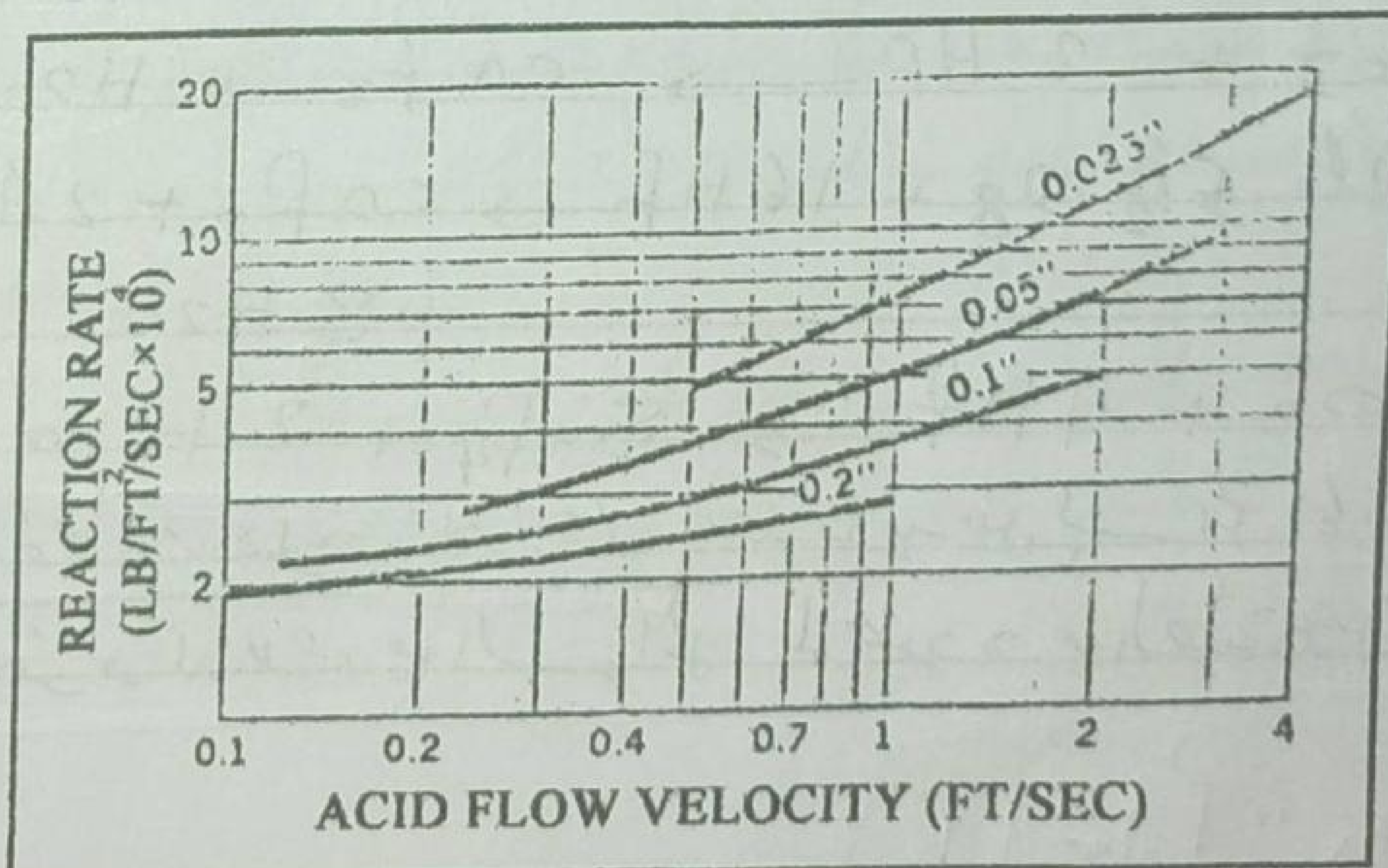
(5) [٥] نواتج التفاعل: تلعب نواتج التفاعل دوراً هاماً في تحديد التفاعل ومن أهم ما يميز نواتج التفاعل هو أن لا تكون رواسب وتؤدي إلى تقليل نفوذية الطبقة مما يسيء إلى هدف عملية التحمض، ومن المواد التي تسبب تشكل الترسبات المتشكلة نتيجة تفاعل الحمض مع بعض الشوارد الموجودة في المياه الطبقية مثل شوارد الألمنيوم التي تترسب على شكل ماءات الألمنيوم وكذلك شوارد الحديد التي تؤدي إلى تشكل ماءات الحديد وشوارد الباريوم التي تؤدي إلى ترسب كبريتات الباريوم.



الشكل (1) يبين العلاقة بين سرعة التفاعل والضغط



الشكل (2) يبين علاقة تركيز حمض كلور الماء ومعدل التفاعل

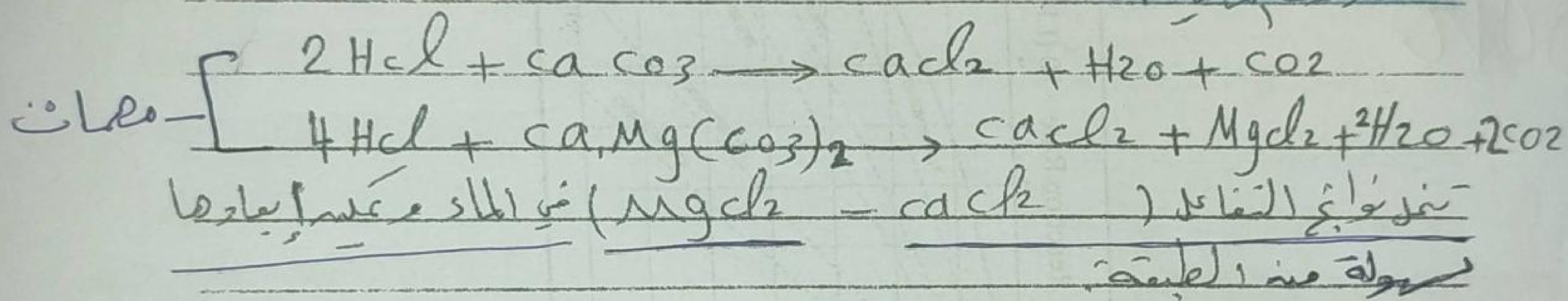


الشكل (3) يبين تأثير سرعة تدفق الحمض على معدل التفاعل عند اختلاف عرض الشق

6 [٦] **تركيب الصخر الخازن:** وهو من العوامل الأكثر أهمية الذي تتحكم بفعالية المعالجة الحمضية، حيث توجد اختلافات بين تفاعلات الحمض مع الأحجار الكلسية وبين تفاعله مع الدولوميت نتيجة الاختلاف في الصفات الفيزيائية والكيميائية، ويجب عند وضع خطة المعالجة دراسة مواصفات الصخر الخازن دراسة مفصلة من حيث التركيب الكيميائي والتركيب المنرالوجي والمسامية والنفوذية.

إن دراسة التركيب الكيميائي للصخور الكربوناتية يدلنا إلى استخدام نوع خاص من الحموض، أما معرفة الصفات الفيزيائية والحركية فهي تحدد العوامل الأخرى مثل كمية الحمض والتقنية المستخدمة في المعالجة.

(دورة) يؤثر حمض كلور الماء على الصخور الكربوناتية (كلس - دولوميت) وفق المعادلات التالية:



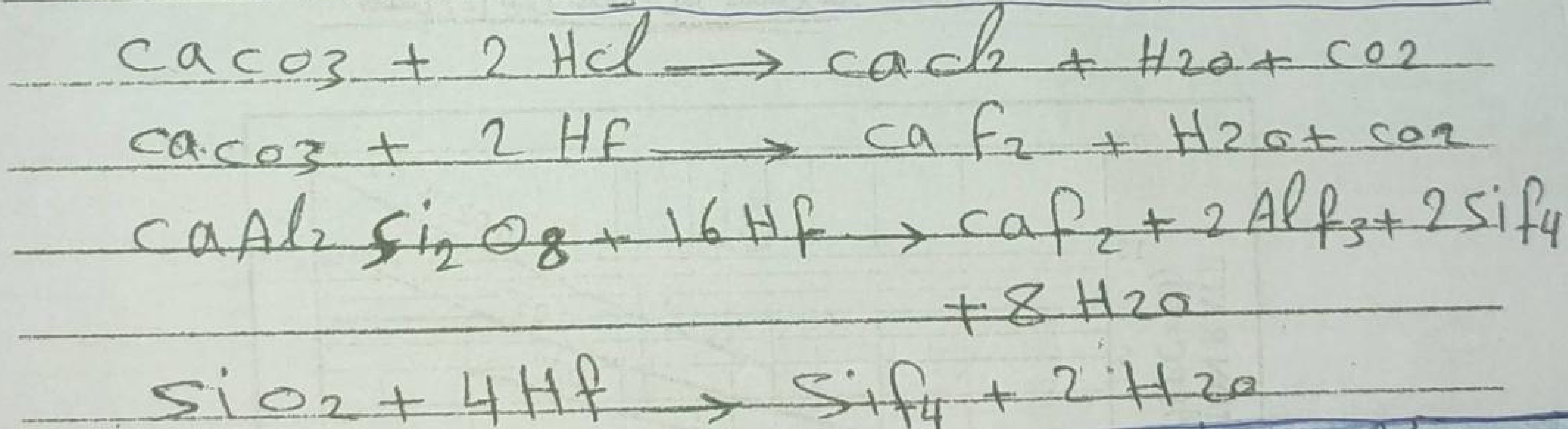
معادلات

$$2HCl + CaCO_3 \rightarrow CaCl_2 + H_2O + CO_2$$

$$4HCl + CaMg(CO_3)_2 \rightarrow CaCl_2 + MgCl_2 + 2H_2O + 2CO_2$$

تنحل نواتج التفاعل ($MgCl_2$ - $CaCl_2$) في الماء ويمكن إخراجها بسهولة من الطبقة.

وعندما تحتوي الطبقة على الرمل نستعمل خليط من ($HF + HCl$) حيث يتفاعل (HCl) مع ملاط الترابط الكلسي للحبيبات الرملية أما (HF) فيتفاعل مع الغضار والرمل وفق المعادلات التالية:



$$CaCO_3 + 2HCl \rightarrow CaCl_2 + H_2O + CO_2$$

$$CaCO_3 + 2HF \rightarrow CaF_2 + H_2O + CO_2$$

$$CaAl_2Si_2O_8 + 16HF \rightarrow CaF_2 + 2AlF_3 + 2SiF_4 + 8H_2O$$

$$SiO_2 + 4HF \rightarrow SiF_4 + 2H_2O$$

7 [٧] **تأثير الضغط على عملية الحمض:** عندما يدخل السائل الحمضي في الطبقة يتفاعل مع الصخر وكذلك مع السوائل الموجودة في الطبقة (نفط وماء)

المعادلات دورات متكررة دائماً

وإن تفاعل النفط مع الحمض تؤدي إلى تشكل مركبات غير منحلة تتوضع في مسامات وشقوق الطبقة مما يؤدي إلى التقليل من نفوذية الطبقة، وهذه المركبات التي تقلل من نفوذية الطبقة هي الإسفلتينات والراتنجات والبارافينات وبعض المشتقات الهيدروكربونية ذات الوزن الجزيئي الكبير التي تتوضع عند ارتفاع (PH) السائل الحمضي.

ويتم منع هذا التوضع بطريقتين:

(1) استعمال سائل حمضي مسبق معالج بمذيبات عطرية.

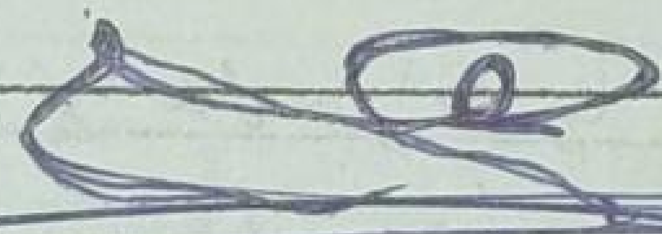
(2) معالجة السائل الحمضي بمواد تمنع تشكل الأحماض القطرانية مثل المواد المنشطة.

[8] تأثير المياه الطبقية في عملية التحميض: تؤدي تفاعل المياه الطبقية مع السائل الحمضي المحقون في الطبقة إلى تشكل بعض المركبات غير المنحلة فتغلق مسامات الطبقة المنتجة بشكل جزئي وأحياناً بشكل كلي، مما تؤدي إلى تقليل النفوذية الفعلية للطبقة، وهذا التأثير متعلق بالتركيب الكيميائي للمياه الطبقية.

من الشوارد الموجودة في الماء والتي تؤثر على عملية التحميض نذكر:

(1) شوارد الحديد والألمنيوم التي تشكل مع الحمض هيدرات الحديد والألمنيوم المترسبة.

(2) شوارد الباريوم التي تشكل مع شوارد الكبريتات كبريتات الباريوم غير المنحلة.



المواد المضافة للسائل الحمضي:

تضاف للسائل الحمضي مواد تقوم بمنع حدوث الظواهر السلبية الناجمة عن وجود الحمض في البئر وهذه المواد هي:

1) **منشطات التفاعل:** تضاف بنسبة ($5 - 10\ L/m^3$)، تعمل هذه المواد على الإقلال من سرعة التفاعل بين الحمض والصخر وذلك لزيادة نفوذية المنطقة المجاورة للبئر ولمسافة أكبر، ويوجد نوعان رئيسيان من المنشطات عضوية وغير عضوية.

المواد المضافة لسائل الحفر

أ- مثبطات التفاعل

٢- مخفضات التوتر السطحي: تستخدم من أجل تخفيض التوتر السطحي عند تلامس السائل الحمضي مع النفط، و للتأمين دخوله إلى الطبقة بسهولة، كما تعمل هذه المواد على عودة المحاليل المعالجة تساهم في التنظيف، ومجالات التركيز لها (0.01 – 0.05%) وزناً، كما تساهم هذه المواد في إزالة الترسبات من النفط الثقيل والإسفلت.

تعداد

٣- المواد المضافة للتحكم بمنع ضياع السائل المحقون: وهي عبارة عن بوليمرات صناعية و مواد صمغية طبيعية، و تستخدم هذه المواد بين (0.1 – 2%) وزناً.

٤- الكحولات: تستخدم من أجل تحسين درجة التنظيف التي تلي المعالجة الحمضية، ومن هذه المواد نذكر كحولات الميثيل أو الإيزوبروبيل عند تركيز (5 – 20%) حجماً، وأهم ما يميز الكحولات عن مخفضات التوتر السطحي أنها لا تمتز على سطح الصخر.

٥- مواد مراقبة: تقوم بتقليل أو منع تأثير السائل الحمضي على المعدات الموجودة في البئر وعلى السطح، و هذه المواد يجب أن تتصف بما يلي:

أ- أن تكون ذات ثبوتية جيدة عند الحرارة العالية.
ب- ألا تؤثر على فعالية الحمض على الصخر.
ج- أن تحافظ على خواصها بوجود نواتج التفاعل.
د- ألا تؤدي إلى تشكيل مستحلبات بين النفط والماء.

٦- مواد مثبتة: تعمل على إعاقة ترسب مركبات الحديد والألمنيوم الناتجة عن تفاعل الحمض مع أكاسيد الحديد والألمنيوم الموجودة في مقر البئر أو في الصخور الطبقية، ومن هذه المواد الحمض الخل و حمض الخل الذي يستخدم بتركيز (0.8 – 2%) حجماً.

٧- مواد تمنع ترسب الجص: من هذه المواد كلور الباريوم الذي يعالج به السائل الحمضي قبل حقنه.

٨- استخدام (N_2) و (CO_2): حيث تساهم هذه الغازات في التزويد بقدرة غازية كبيرة كي تساعد في إعادة الحمض المستنفذ وضخ البترول للإنتاج.

٩- مانعات تآكل الحمض: يضاف بنسبة (0.5 - 1٪) من أجل تقليل تآكل المواد المعدنية السطحية والجوفية.

١٠- مانعات استحلاب: يضاف بنسبة ($5\ L/m^3$) بهدف منع تشكيل مستحلبات لزجة ما بين السائل الحمضي وسوائل الطبقة.

أهداف عملية التحميض:

يستخدم التحميض من أجل ثلاثة أهداف هي:

١- تنظيف مسام البئر ٢- تحميض الطبقة ٣- التشقق الحمضي.

١- تنظيف مسام البئر: يتم غسل البئر عن طريق ضخ السائل الحمضي من خلال مواسير الإنتاج لتنظيفها أيضاً، ويتم ترك الحمض في البئر لتنظيف جدران البئر وقعره، ويتم عن طريق هذه العملية إزالة الرواسب المختلفة (سائل الحفر - بارافينات)، وبذلك نخفف من تفاعل السائل الحمضي داخل البئر وقبل دخوله في الطبقة عند تفاعله مع هذه الرواسب الأمر الذي يؤدي إلى تقليل فعالية التحميض، ويتم هذا التفاعل خلال عدة ساعات بعد ذلك يتم إزاحة السائل الحمضي من خلال مواسير الإنتاج لمنع حدوث تآكل في مواسير التغليف.

٢- تحميض الطبقة: وهو حقن الطبقة بالسائل الحمضي تحت ضغط صغير وليس كبير بحيث يحدث الجريان بشكل أساسي من خلال الشقوق الطبيعية والمسامات لذلك للنفوذية الطبيعية تأثير كبير على نجاح عمليات التحميض.

٣- التشقق الحمضي: تهدف هذه العملية بشكل أساسي إلى تحقيق إنتاجية إضافية فوق حدود الخزان الطبيعية وذلك عن طريق فتح شقوق جديدة لخلق ممرات جديدة في جزء من الطبقة الكائنة، ويعتمد نجاح هذه العملية على:

أ- ناقلية الشق ب- مدى الاختراق لفعالية الخزان ج- شكل الشق.

مهمة

المسافة التي يخترقها الحمض في الطبقة:

تعتمد المسافة العظمى التي يدخلها الحمض في الطبقة متفاعلاً معها على:

١) سرعة تقدم السائل الحمضي في مسامات الطبقة.

٢) الزمن اللازم لتعادل السائل الحمضي مع الصخر (t_r) وهو يساوي زمن تفاعل السائل مع الصخر ويعتمد على درجة حرارة وضغط وتركيز السائل الحمضي وكذلك على خواص الصخور.

٣) يتحقق نصف القطر (R_l) لدخول الحمض في الطبقة عند تعادل أول كمية محقونة من السائل الحمضي تماماً مع الصخر. ومن أجل تعيين (R_l) نفرض أن حجم السائل المحقون يساوي حجم الفراغات الموجودة في الطبقة أي:

$$h \cdot m (R_l^2 - r_c^2)\pi = Q_i \cdot t_r$$

R_l: نصف قطر المنطقة التي يدخلها السائل الحمضي متفاعلاً مع الصخر (m).

Q_i: معدل الحقن (m^3/sec).

t_r: الزمن اللازم لتعادل السائل الحمضي.

h: سماكة الطبقة المعالجة (m).

m: مسامية الطبقة (%).

r_c: نصف قطر البئر (m).

من العلاقة السابقة نجد أنه يمكن زيادة (R_l) عن طريق:

١- تقليل سرعة التفاعل بين الصخر والسائل عن طريق استخدام مبطئات التفاعل.

٢- حقن السائل في البئر وبالتالي في الطبقة بمعدل كبير.

٤) في حال دخول الحمض في الطبقة غير متفاعل معها فإنه يدخل حتى مسافة نصف قطر (R_i)، ويتم حساب (R_i) بنفس الطريقة لكن حسابه لا يهمنا لأن الحمض على هذه المسافة (R_i) يكون قد انتهى كحمض بعد نهاية التفاعل، ويحسب (R_i) من تساوي الحجم الكلي المحقون والفراغات.

في الطبقة:

$$h \cdot m \cdot (R_i^2 - r_c^2) \cdot \pi = Q_i \cdot t_i$$

t_i: الزمن الكلي لحقن السائل الحمضي في الطبقة:

طرق التحميض:

انتشار المادة